



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ - ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ  
ΗΡΩΩΝ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΥ 9  
15780 ΖΩΓΡΑΦΟΥ ΑΘΗΝΑ

## ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗ & ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΩΝ

Διδάσκων:

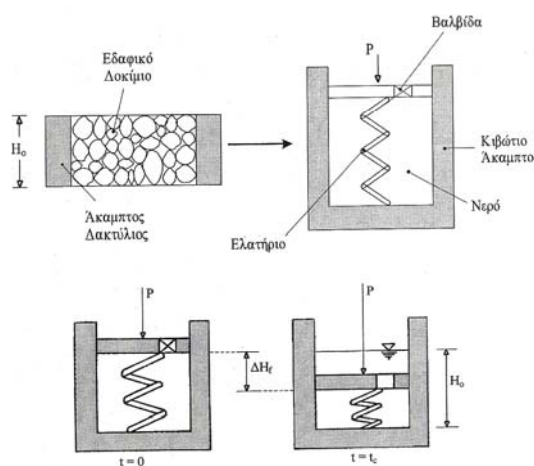
**Κωνσταντίνος Λουπασάκης**, Επικ. Καθηγητής ΕΜΠ

Τομέας Γεωλογικών Επιστημών, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών

## ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ - ΚΑΘΙΖΗΣΕΙΣ

## Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

- Η μονοδιάστατη παραμόρφωση λαμβάνει χώρα όταν σε ένα εδαφικό στοιχείο επιβάλλεται κατακόρυφη φόρτιση (Z) ενώ ταυτόχρονα παρεμποδίζονται οι πλευρικές παραμορφώσεις κατά τον άξονα (X, Y) καθώς και όλες οι διατμητικές παραμορφώσεις.
- Καθώς οι εδαφικοί κόκκοι και το νερό των πόρων είναι πρακτικά ασυμπίεστα, η μεταβολή του όγκου ενός κορεσμένου εδαφικού στοιχείου πρέπει να συνοδεύεται από ισόποση διαφυγή ή εισρόφιση νερού.
- Εξαιτίας της περιορισμένης διαπερατότητας των εδαφικών υλικών, η κίνηση του νερού διαμέσου των πόρων απαιτεί χρόνο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την παρατήρηση υστέρησης μεταξύ της επιβολής της φόρτισης και της εκδήλωσης των παραμορφώσεων.
- Η μονοδιάστατη παραμόρφωση λαμβάνει συχνά χώρα τόσο στο φυσικό περιβάλλον όσο και στο τασιικό πεδίο που αναπτύσσεται στο περιβάλλον των κατασκευών. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι κατά την ιζηματογένεση επιβάλλονται κατακόρυφες πιέσεις ενώ ταυτόχρονα λόγω της μεγάλης έκτασης των στρώσεων παρεμποδίζονται οι πλευρικές παραμορφώσεις. Αντίστοιχες συνθήκες παρατηρούνται στο χώρο κάτω από εκτεταμένες θεμελιώσεις αλλά και σε μικρά βάθη κάτω από μεμονωμένα πέδιλα.



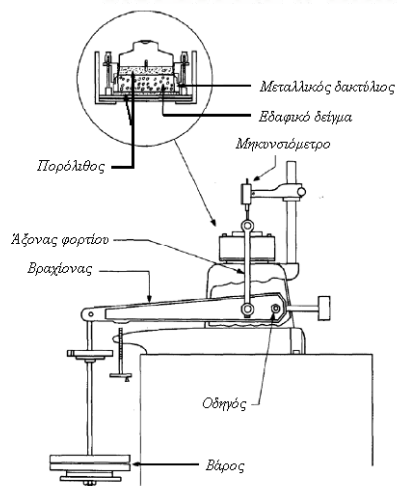
Μοντέλο για τη μελέτη της στερεοποίησης

## ΔΟΚΙΜΗ ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ

Η μελέτη της μονοδιάστατης παραμόρφωσης και στερεοποίησης ενός αδιατάραχτου ή αναζυμωμένου εδαφικού δοκιμίου, υπό την επίδραση κατακόρυφου φορτίου και με περιοριζόμενη πλευρική παραμόρφωση, μελετάται με τη Δοκιμή Μονοδιάστατης Στερεοποίησης ή Δοκιμή Οιδημέτρου.



## ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ & ΠΡΟΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ



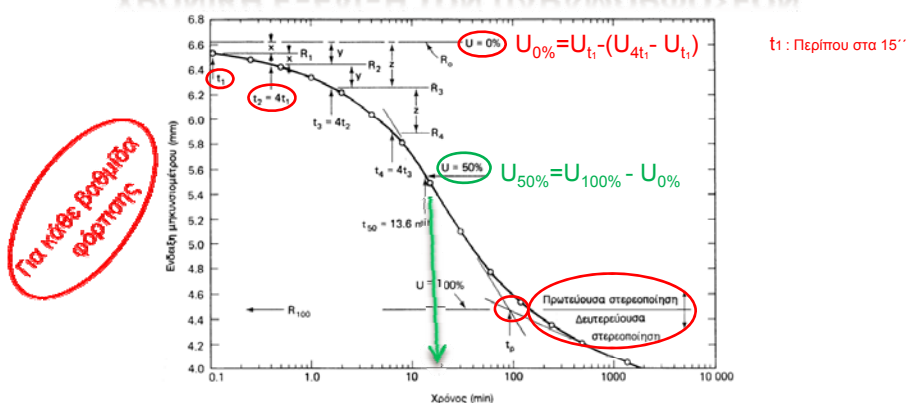
**Διαστάσεις δοκιμίου:** Ελάχιστη διάμετρος δοκιμίου ( $\varnothing$ ) 50,8 mm, ελάχιστο ύψος δοκιμίου 12,5 mm. Ελάχιστος λόγος διαμέτρου προς ύψος 2,5.

**Προπαρασκευή δοκιμίου:** Η κοπή του αδιατάραχτου ή του αναζυμωμένου δείγματος πραγματοποιείται με τη χρησιμοποίηση ενός δακτυλίου με κοφτερή αιχμή. Το τελικό δοκίμιο θα πρέπει να μην παρουσιάζει ανωμαλίες ή κενά και θα πρέπει να έχει παράλληλες και επίπεδες έδρες.

## ΠΟΡΕΙΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΟΙΔΗΜΕΤΡΟΥ

- Το δοκίμιο ζυγίζεται και τοποθετείται εντός της συσκευής στερεοποίησης. Στην άνω και κάτω επιφάνεια του δοκιμίου προσαρμύζονται υγρανθέντες πορόλιθοι οι οποίοι επιτρέπουν τον συνεχή κορεσμό και αποστράγγισή του).
- Μέσω της διάταξης φόρτισης εφαρμόζεται μια μικρή αρχική τάση (0,02 - 0,05 kgf/cm<sup>2</sup> ανάλογα της φύσης του εδάφους), το δείγμα διαβρέχεται και μετά από 5 min ξεκινάει η καταγραφή των παραμορφώσεων με το μηκυνσιόμετρο. Αν καταγραφεί διόγκωση, το αρχικό φορτίο πολλαπλασιάζεται μέχρι την παύση της. Μετά την παύση της διόγκωσης ξεκινά εκ νέου η διαδικασία καταγραφής των μετακινήσεων.
- Η φόρτιση του δοκιμίου πραγματοποιείται σε βαθμίδες 0,125 - 0,25 - 0,50 - 1,0 - 2,0 - 4,0 - 6,0 - 8,0 .... kgf/cm<sup>2</sup>. Σε κάθε βαθμίδα φόρτισης η τάση παραμένει σταθερή μέχρι το πέρας της πρωτογενούς στερεοποίησης. Πρακτικά, η τελική τάση στερεοποίησης πρέπει να είναι τετραπλάσια της τάσης προστεροποίησης και διπλάσια των αρχικών τάσεων, στο βάθος λήψης του δείγματος.
- Μετά το πέρας της φόρτισης του δοκιμίου, μπορεί να ακολουθήσει αποφόρτιση σε μία ή περισσότερες βαθμίδες.

## ΧΡΟΝΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ



- Προσδιορισμός παραμορφώσεων που αντιστοιχούν στην αρχή - τέλος της πρωτεύουσας στερεοποίησης.
- Προσδιορισμός παραμόρφωσης και χρόνου  $t_{50}$  που αντιστοιχεί στο 50% της πρωτεύουσας στερεοποίησης.
- Υπολογισμός του Συντελεστή Μονοδιάστατης Στερεοποίησης,  $C_v$  (cm<sup>2</sup>/sec)

**ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ή ΠΡΩΤΕΥΟΥΣΑΣ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ,  $C_v$**

Ο Συντελεστής Μονοδιάστατης Στερεοποίησης,  $C_v$ , υπολογίζεται για συγκεκριμένη βαθμίδα φόρτισης. Εκφράζει την ταχύτητα με την οποία αποστραγγίζεται κατά τη στερεοποίηση ένας εδαφικός σχηματισμός ανά μονάδα επιφανείας.

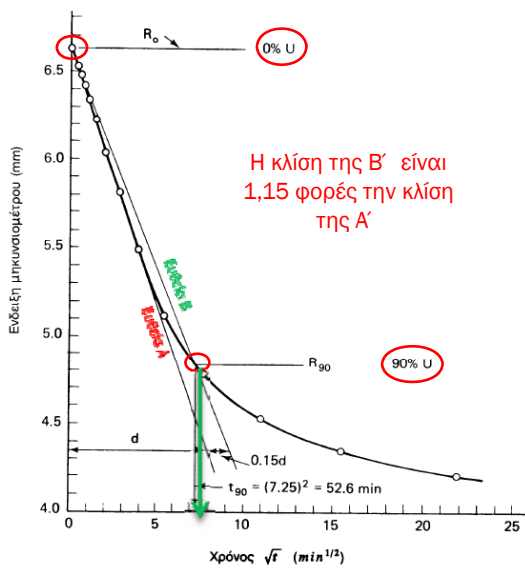
U%	$T_v$
0	0
5	0,0017
10	0,0077
15	0,0177
20	0,0314
25	0,0491
30	0,0707
35	0,0962
40	0,126
45	0,159
50	0,196
55	0,238
60	0,286
65	0,342
70	0,403
75	0,477
80	0,567
85	0,684
90	0,848
95	1,129
100	∞

**Μέθοδος Casagrande**

$$c_v = \frac{T_{50} \cdot H_0^2}{4 \cdot t_{50}} = \frac{0,196 \cdot H_0^2}{4 \cdot t_{50}} = 0,049 \frac{H_0^2}{t_{50}}$$

$T_v$ ,  $T_{50}$ : Αδιάστατος Παράγοντας Χρόνου  
 $H_0$ : Αρχικό ύψος δοκιμίου

**Μέθοδος Taylor**



➤ Προσδιορισμός παραμόρφωσης που αντιστοιχεί στην αρχή και στο 90% της πρωτεύουσας στερεοποίησης.  
 ➤ Υπολογισμός του Συντελεστή Μονοδιάστατης Στερεοποίησης,  $C_v$  ( $cm^2/sec$ )

$$c_v = \frac{T_{90} \cdot H_0^2}{4 \cdot t_{90}} = \frac{0,848 \cdot H_0^2}{4 \cdot t_{90}} = 0,212 \frac{H_0^2}{t_{90}}$$

$T_v$ ,  $T_{90}$ : Παράγοντας Χρόνου  
 $H_0$ : Αρχικό ύψος δοκιμίου

Για κάθε βαθμίδα φόρτισης

### ΣΧΕΣΗ ΤΑΣΕΩΝ - ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ

**Υπολογισμός:**

- της τάσης προστερεοποίησης,  $P_c$ .
- του δείκτη συμπίεστος,  $C_c$ .
- του συντελεστή συμπίεστος,  $\alpha_v$  ( $m^2/kN$ ).
- του συντελεστή Διαπερατότητας,  $K$  ( $cm/sec$ )
- Του συντελεστή συμπίεστος σε όγκο,  $m_v$  ( $cm^2/kg$ )
- Του οιδημετρικού μέτρου ελαστικότητας,  $E_s$  ( $kN/m^2$ )

Από το σύνολο των Βαθμίδων φόρτισης

### ΜΕΤΡΟ ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ

Το μέτρο της μονοδιάστατης συμπίεσης ορίζεται μέσω του συντελεστή συμπίεστος,  $\alpha_v$ , και του δείκτη συμπίεστος,  $C_c$ . Ο συντελεστής συμπίεστος μειώνεται όσο αυξάνεται η τάση ενώ αντίθετη εξέλιξη έχει ο δείκτης συμπίεστος.

**Ο δείκτης συμπίεστος,  $C_c$ ,** εκφράζει το πόσο συμπίεστος είναι ο εδαφικός σχηματισμός. Είναι αδιάστατο μέγεθος. Παίρνει τιμές από 0,30-0,50 για απροφόρτιστα κορεσμένα αργιλικά υλικά έως 0,25-0,08 για στερεοποιημένες αργιλοάμμους.

Καθώς το τελευταίο τμήμα της καμπύλης είναι σχεδόν ευθύγραμμο η τιμή του δείκτη, που ορίζεται ως η εφαπτομένη στο τμήμα αυτό, θεωρείται σταθερή και ανεξάρτητη των βαθμίδων φόρτισης.

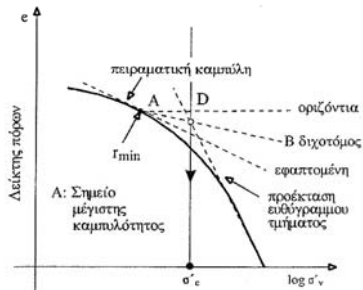
$\alpha_v = \frac{-\Delta e}{\Delta \sigma'_v}$

$C_c = \frac{-\Delta e}{\Delta \log \sigma'_v}$

**Ο δείκτης διόγκωσης,  $C_s$ ,** εκφράζει το πόσο διογκώνεται ο εδαφικός σχηματισμός κατά το στάδιο της αποφόρτισης.

**Ο δείκτης επανασυμπίεσης,  $C_r$ ,** εκφράζει το πόσο συμπιέζεται ο εδαφικός σχηματισμός κατά το στάδιο της επανασυμπίεσης.

## ΤΑΣΗ ΠΡΟΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ



Η γνώση της τάσης προστερεοποίησης,  $\sigma_p$ , συγκρινόμενη με τις ενεργές τάσεις στη στάθμη δειγματοληψίας, επιτρέπει τον προσδιορισμό του βαθμού στερεοποίησης του υλικού, δηλαδή αν το υλικό είναι κανονικά στερεοποιημένο, υπερστερεοποιημένο ή υποστερεοποιημένο.

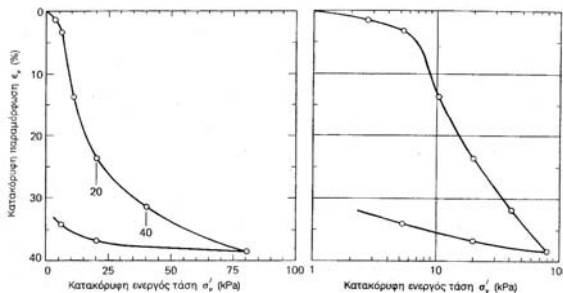
Ο λόγος  $\sigma_p/\sigma'_v$  προσδιορίζει το OCR. Υπάρχουν διάφορες γραφικές μέθοδοι για τον υπολογισμό της τάσης προστερεοποίησης, απλούστερη των οποίων είναι η μέθοδος Casagrande.

**Μέθοδος Casagrande:** Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή στο σημείο μέγιστης καμπυλότητας της καμπύλης  $e-\log \sigma_v$ , χαράσσονται τρεις ευθείες, μια εφαπτόμενη, μια οριζόντια και η διχοτόμος της γωνίας τους. Το σημείο τομής της διχοτόμου με την εφαπτόμενη στο τελευταίο ευθύγραμμο τμήμα ορίζει την τάση προστερεοποίησης,  $\sigma_p$ .

## ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

**Οιδημετρικό μέτρο ελαστικότητας  $E_s, E_{oed}$  ( $\text{kN/m}^2$ ):** παρουσιάζει τη σχέση τάσεων - παραμορφώσεων. Προκύπτει από τη γραφική παράσταση  $\epsilon_v - \sigma'_v$ . Υπολογίζεται για κάθε βαθμίδα φόρτισης.

**Συντελεστής συμπίεσότητας σε όγκο,  $m_v$  ( $\text{cm}^2/\text{kg}$ ):** Είναι το αντίστροφο του μέτρου ελαστικότητας. Προκύπτει από τη γραφική παράσταση  $\epsilon_v - \sigma'_v$ . Υπολογίζεται για κάθε βαθμίδα φόρτισης.



$$E_{oed} = \frac{\Delta \sigma'_v}{\Delta H / H_0}$$

$$m_v = \frac{\Delta H / H_0}{\Delta \sigma'_v} = \frac{1}{E_{oed}}$$

Χρήσιμες συσχετίσεις:

$$m_v = \frac{a_v}{1 + e_0} \quad K_v = \frac{c_v \cdot m_v \cdot \gamma_w}{1000}$$

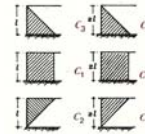
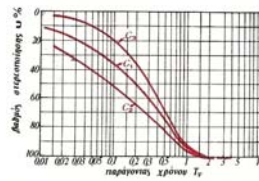
### ΒΑΘΜΟΣ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ VS ΧΡΟΝΟΣ

Ο βαθμός στερεοποίησης, U, υπολογίζεται σε συνάρτηση με τον παράγοντα χρόνου, T<sub>v</sub>, σύμφωνα με τη γενική σχέση:

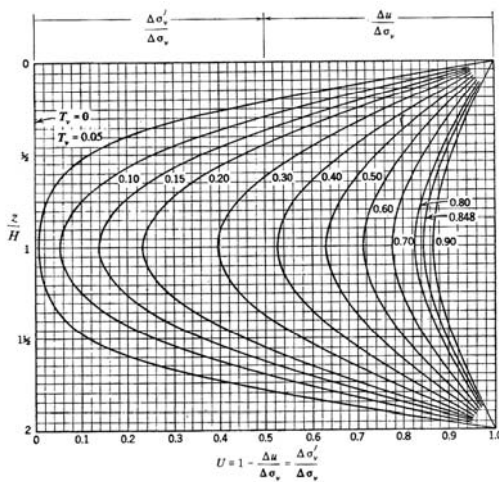
$$T_v = \frac{c_v \cdot t}{H^2}$$

U%	T <sub>v</sub>
0	0
5	0,0017
10	0,0077
15	0,0177
20	0,0314
25	0,0491
30	0,0707
35	0,0962
40	0,126
45	0,159
50	0,196
55	0,238
60	0,286
65	0,342
70	0,403
75	0,477
80	0,567
85	0,684
90	0,848
95	1,129
100	∞

C<sub>v</sub>: συντελεστής στερεοποίησης στην ανάλογη βαθμίδα φόρτισης  
 t: χρόνος στερεοποίησης  
 H: μήκος αποστράγγισης



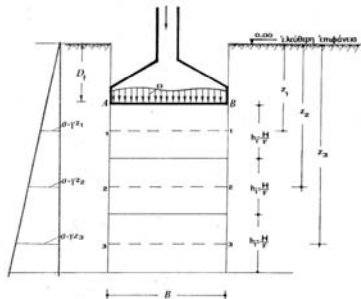
\*\*Ο συντελεστής παράγοντας χρόνου, T<sub>v</sub>, εκφράζει το χρόνο με αδιάστατη μορφή και καθορίζει τη χρονική κλίμακα εξέλιξης του φαινομένου της στερεοποίησης.



Νομογράφημα προσδιορισμού του παράγοντα χρόνου, T<sub>v</sub>, σε συνάρτηση με το βάθος και το βαθμό στερεοποίησης, U (Taylor, 1948).



## ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΑΘΙΖΗΣΕΩΝ



Έδαφος κανονικά στερεοποιημένο

$$\Delta H_i = H_i \frac{C_c}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_{v,τελ}}{\sigma'_{v,i}}$$

Έδαφος ισχυρά υπερστερεοποιημένο,

$$\sigma_{v,τελ}' < \sigma_p$$

$$\Delta H_i = H_i \frac{C_r}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_{v,τελ}}{\sigma'_{v,i}}$$

Έδαφος μέτρια υπερστερεοποιημένο,

$$\sigma_p < \sigma_{v,τελ}'$$

$$\Delta H_i = H_i \frac{C_r}{1 + e_0} \log \frac{\sigma_p}{\sigma'_{v,i}} + H_i \frac{C_c}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_{v,τελ}}{\sigma_p}$$

$$\Delta H_{τελ} = \sum_{i=0}^n \Delta H_i$$

## ΚΑΘΙΖΗΣΕΙΣ ΨΑΘΥΡΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

Η άμεση καθίζηση που καταγράφεται στους ψαθυρούς εδαφικούς σχηματισμούς (ξηρές αργιλούς και ιλύες, άμμους) δε σχετίζεται με το φαινόμενο της στερεοποίησης. Μπορεί να μελετηθεί με τη θεωρία ελαστικότητας και πιο συγκεκριμένα με τη θεωρία του Boussinesq. Η παραμόρφωση αυτή για τα συγκεκριμένα υλικά μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελεί την ολική τιμή της καθίζησης.

### ΚΑΘΙΖΗΣΕΙΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΩΝ

$$w = pB \left( \frac{1 - \nu^2}{E_s} \right) I_w$$

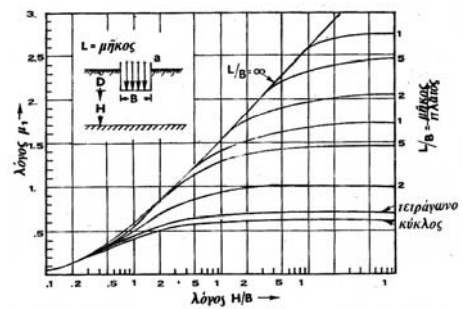
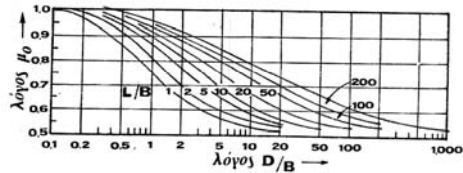
Όπου:  
 P: Φορτίο θεμελίωσης  
 B: Μικρή διάσταση θεμελίου  
 ν: Λόγος Poisson  
 E<sub>s</sub>: Μέτρο ελαστικότητας  
 I<sub>w</sub>: Συντελεστής σχήματος και ακαμψίας θεμελίωσης.

Σχήμα	Συντελεστής σχήματος I <sub>w</sub> και στροφής I <sub>m</sub>				
	Εξοκτικό			Άκοκτο	
	Κέντρο	Άκρο	Μέση τιμή	I <sub>w</sub>	I <sub>m</sub>
Κύκλος	1,00	0,64	0,85	0,88	
Τετράγωνο	1,12	0,56	0,95	0,82	3,70
Όρθογώνιο					
L/b = 1,50	1,36	0,68	1,20	1,06	4,12
= 2,00	1,53	0,77	1,31	1,20	4,38
= 5,00	2,10	1,05	1,83	1,70	4,82
10,00	2,52	1,26	2,25	2,10	4,93
100,00	3,38	1,69	2,96	3,40	5,06

## ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΒΑΘΟΥΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΙΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΤΙΜΗ ΤΗΣ ΑΜΕΣΗΣ ΚΑΘΙΣΗΣΗΣ

$$w = \mu_0 \mu_1 \rho B \left( \frac{1 - \nu^2}{E_s} \right)$$

Όπου:  
 P: Φορτίο θεμελίωσης  
 B: Μικρή διάσταση θεμελίου  
 ν: Λόγος Poisson  
 E<sub>s</sub>: Μέτρο ελαστικότητας  
 μ<sub>0</sub>, μ<sub>1</sub>: Συντελεστής σχήματος και βάθους θεμελίωσης.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Γραμματικόπουλος Γ., Μάνου - Ανδρεάδου Ν., Χατζηγώγος Θ. (1998), Εδαφομηχανική - ασκήσεις και προβλήματα, Εκδόσεις Αφοί Κυριακίδη, Θεσσαλονίκη.
- Καββαδάς Μ. (2009) Στοιχεία Εδαφομηχανικής, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα.
- Παπαδόπουλος Β. (2003), Στοιχεία Γεωτεχνικής, Σημειώσεις ΕΜΠ.
- Παπαχαρίσης Ν., Μάνου-Ανδρεάδη Ν., Γραμματικόπουλος Ι., (1999) Γεωτεχνική Μηχανική, Εκδόσεις Αφοί Κυριακίδη, Θεσσαλονίκη.
- Τσότσος Στ. (1991), Εδαφομηχανική - Θεωρία Μέθοδοι Εφαρμογές, Εκδόσεις Φ. Βερβερίδης & Π. Πολυχρονίδης α.ε., Θεσσαλονίκη.